

DOI:10.11992/tis.201604026

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1538.TP.20170227.1804.014.html>

# 传感器优化布置的距离系数-Fisher 信息准则

董小圆, 彭珍瑞, 殷红, 董海棠

(兰州交通大学 机电工程学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:**以损伤参数识别为目标, 基于传统 Fisher 信息准则的传感器优化布置会出现测点局部聚集现象, 导致信息冗余, 不利于损伤定位。针对此问题, 首先以反映信息独立程度的距离系数对候选自由度的 Fisher 信息矩阵进行加权修正; 然后以修正后的有效信息矩阵行列式最大化为目标, 采用逐步累加的方法得到基于距离系数-Fisher 信息准则的传感器优化布置方案。采用该方法对一个 16 自由度剪切型弹簧质量模型进行传感器优化布置。结果表明, 该方法能有效避免测点聚集现象, 解决信息冗余问题。

**关键词:**传感器优化布置; 损伤识别; Fisher 信息矩阵; 信息冗余; 欧氏距离; 灵敏度分析; 模态分析

**中图分类号:**TP391 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-4785(2017)01-0032-06

中文引用格式: 董小圆, 彭珍瑞, 殷红, 等. 传感器优化布置的距离系数-Fisher 信息准则[J]. 智能系统学报, 2017, 12(1): 32-37.

英文引用格式: DONG Xiaoyuan, PENG Zhenrui, YIN Hong, et al. [J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2017, 12(1): 32-37.

## Distance coefficient-Fisher information criterion for optimal sensor placement

DONG Xiaoyuan, PENG Zhenrui, YIN Hong, DONG Haitang

(School of Mechatronic Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** For damage parameters identification, when the traditional Fisher information criterion is used for optimal sensor placement, the measuring points are susceptible to gathering in a local sensitivity area, which results in information redundancy and this is not conducive to damage location. To avoid aggregation of the measuring points and improve the ability of the damage location, the distance coefficient, which reflects the degree of information independence, was used first to correct the Fisher information matrix, and then the measuring points were obtained by maximizing the determinant of the modified information matrix using a sequential algorithm. The method was employed to design the optimal sensor configuration for a simple 16-DOF chain mass-spring model. The results show the method can effectively avoid the aggregation of measuring points and solve the problem of information redundancy.

**Keywords:** optimal sensor placement; damage detection; Fisher information matrix; information redundancy; Euclidean distance; sensitivity analysis; modal analysis

利用测得的动态数据进行结构损伤识别是结构健康监测的重要环节, 传感器位置的选择对损伤识别结果有重要影响<sup>[1]</sup>, 现存的一些损伤识别方法在进行振动测试时, 一般根据工程经验在结构上均匀布置传感器<sup>[2]</sup>, 或采用分步式的布置方式测量模

型全部节点上的动态响应<sup>[3]</sup>, 需要测点较多, 测试方案复杂。传感器优化布置就是将传感器布置在结构信息最丰富的位置, 用尽量少的传感器获得尽可能多的结构状态信息, 以便在噪声环境下准确识别结构参数, 及时发现结构损伤。

进行传感器优化布置时, 首先要确定传感器优化布置的准则, 其次设计相适应的优化算法。目前常用的优化准则有模态保证准则<sup>[4]</sup>、模态动能

收稿日期: 2016-04-21. 网络出版日期: 2017-02-27.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61463028); 甘肃省自然科学基金项目(1506RJZA069).

通信作者: 彭珍瑞. E-mail: pzri@163.com.

法<sup>[5-6]</sup>,模型缩减法<sup>[7]</sup>、Fisher 信息准则<sup>[8]</sup>等。李东升等<sup>[9]</sup>对上述方法进行了综述,并分析了不同方法之间数学本质上的内在联系与差异。其中,基于 Fisher 信息矩阵的传感器优化布置策略在现今发展较为成熟,通过最大化 Fisher 信息矩阵的某一范数实现传感器位置的优化。Kammer<sup>[10]</sup>将信息阵准则应用于结构模态识别的传感器布置问题,提出了有效独立法,通过最大化信息阵的行列式来逐步消除对目标模态向量线性无关贡献最小的自由度。Kammer等<sup>[11]</sup>还提出了三维方向的有效独立法,实现了对多维传感器的优化布置;Yi 等<sup>[12]</sup>结合有效独立法和模态保证准则提出了一种新的多维传感器优化布置准则,并引入狼群算法提高了计算效率;Castro 等<sup>[13]</sup>将有效独立法应用到木结构中,在考虑材料参数的不确定性的情况下实现了传感器位置的优化;为了准确测量结构的中频振动特性,Nimityongskul 等<sup>[14]</sup>对结构频响函数进行主成分分析得到主方向,以各主方向对应的频率响应作为估计目标,构造 Fisher 信息矩阵,实现了基于频率响应的有效独立法;Friswell 等<sup>[15]</sup>证明了当布置较多数量的传感器时,采用有效独立法得到的传感器布置方案会出现测点局部聚集现象,从而不能保证目标模态的线性无关性;为了避免测点聚集产生的信息冗余问题,Li 等<sup>[16]</sup>采用 K-均值聚类算法,根据动态特性的相似程度对结构自由度进行归类,在每一类中分别确定传感器位置,得到空间分布较为合理的传感器布置方案。

在对损伤参数识别的传感器优化布置问题中,最大化 Fisher 信息矩阵的行列式得到的传感器优化测点集中于损伤参数敏感区,可以有效判定是否发生损伤,但空间距离较近的候选测点往往会提供重复的信息,测点集中产生信息冗余,不利于损伤定位<sup>[17]</sup>。为此,以反映信息独立程度的距离系数对候选自由度的 Fisher 信息矩阵进行加权修正,以修正后的有效 Fisher 信息阵行列式最大化为目标,采用逐步累加的方法确定传感器测点。采用该方法对一个 16 自由度剪切型弹簧质量模型进行传感器优化布置,并与传统 Fisher 信息准则下的传感器配置结果进行对比分析。

## 1 传感器优化布置问题的数学模型

对于一个具有  $N_d$  个自由度的线性结构模型,其运动微分方程可以表示为

$$\begin{aligned} M\ddot{X} + C\dot{X} + KX &= F(t) \\ \dot{X}(0) &= \dot{X}_0, X(0) = X_0 \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $M, C, K \in \mathbf{R}^{N_d \times N_d}$  分别为质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $\dot{X}_0$  和  $X_0$  为初始状态; $X \in \mathbf{R}^{N_d}$  是对应于结构外部激励  $F(t) \in \mathbf{R}^{N_d}$  的位移响应。通常结构在发生损伤时,质量不会发生变化,而刚度和阻尼会发

生变化,因此定义与刚度和阻尼有关的结构损伤参数:

$$\theta = [\theta_C^T \theta_K^T]^T \quad (2)$$

假设能够获得全部  $N_d$  个自由度上的结构响应:

$$Z(t) = g(X(\theta), t) \quad (3)$$

式中: $Z(t) \in \mathbf{R}^{N_d}$  为测得响应,函数  $g(\cdot)$  表示测量过程。由于损伤识别的目的是准确识别结构损伤参数的变化,取式(3)的变分形式:

$$\delta Z(t) = (\nabla_X g)(\nabla_\theta X) \delta \theta \quad (4)$$

式中: $\nabla_X g = \partial g / \partial X$ , 当测量  $g_i(\cdot)$  仅与  $X_i$  线性相关时,函数  $g(\cdot)$  即为对角变换矩阵  $G = \text{diag}(g_1, g_2, \dots, g_{N_d})$ , 从而  $\nabla_X g = G$ ;  $\nabla_\theta X$  为结构响应对损伤参数的雅可比矩阵。

考虑噪声的影响,则有

$$\delta Z(t) = (\nabla_X g)(\nabla_\theta X) \delta \theta + \varepsilon(t) \quad (5)$$

式中:误差向量  $\varepsilon(t) \in \mathbf{R}^{N_d}$  包含了测量噪声和模型误差,一般假定为方差为  $\sigma^2$  的高斯白噪声,即  $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2 I_{N_d})$ 。

传感器优化布置就是以包含尽量多的损伤信息为条件,从结构模型的全部  $N_d$  个自由度中选择  $N_0$  个位置作为传感器测点,这  $N_0$  个位置的时程响应要对损伤的变化足够敏感。其选择过程表示为

$$Y(t) = SZ(t) \quad (6)$$

式中: $Y(t) \in \mathbf{R}^{N_0}$  为  $N_0$  个传感器的测量输出,  $S \in \mathbf{R}^{N_0 \times N_d}$  为测量矩阵,是模型全部自由度到测量自由度的映射。用由 0 和 1 组成的  $N_d$  维向量  $p$  作为传感器布置向量,若  $p$  的第  $j$  个元素为 1,表示在第  $j$  个自由度布置传感器,否则在该自由度不安装传感器,则有

$$p = \text{diag}(S^T, S) \quad (7)$$

对式(6)求差分后代入式(5),可得

$$\delta Y(t) = S(\nabla_X g)(\nabla_\theta X) \delta \theta + S\varepsilon(t) \quad (8)$$

当测量函数  $g_i(\cdot)$  与  $X_i$  成线性关系时,式(8)又可简化为

$$\delta Y(t) = SG(\nabla_\theta X)(\nabla_\theta X) \delta \theta + S\varepsilon(t) \quad (9)$$

## 2 Fisher 信息准则及 Fisher 信息矩阵的计算

### 2.1 Fisher 信息准则

假定可以获得结构损伤参数的无偏估计量,根据 Cramer-Rao 不等式则有

$$E[(\delta \hat{\theta} - \delta \theta)(\delta \hat{\theta} - \delta \theta)^T] \geq J^{-1}(\delta \theta) \quad (10)$$

式中: $\delta \hat{\theta}$  为  $\delta \theta$  的估计; $J(\delta \theta)$  为 Fisher 信息矩阵,即

$$\begin{aligned} J(\delta \theta) &= \sum_{t=1}^N (SG \nabla_\theta X(t))^T (S \Sigma(t) S^T)^{-1} (SG \nabla_\theta X(t)) \\ &\quad (11) \end{aligned}$$

式中: $\Sigma(t)$  为噪声  $\varepsilon(t)$  的协方差矩阵。当测得的数据就是结构的响应时,  $G = I_{N_d}$ , 式(11)可简化为

$$\begin{aligned} J(\delta \theta) &= \sum_{t=1}^N (S \nabla_\theta X(t))^T (S \Sigma(t) S^T)^{-1} (S \nabla_\theta X(t)) \\ &\quad (12) \end{aligned}$$

达到 Cramer-Rao 下界的无偏估计量称为有效估计量,即式(10)的不等式变为等式:

$$E[(\delta\hat{\theta} - \delta\theta)(\delta\hat{\theta} - \delta\theta)^T] \geq J^{-1}(\delta\theta) \quad (13)$$

由式(13)可以看出,最大化 Fisher 信息矩阵将使得估计误差的协方差矩阵最小化<sup>[8]</sup>。因此,传感器优化布置的目标就是选择适当的  $S$ ,使得 Fisher 信息阵的某一种范数最大化,从而使结构损伤参数的估计误差尽可能小。

## 2.2 Fisher 信息矩阵的计算

从式(12)可以看出,Fisher 信息矩阵计算的关键在于求得雅可比矩阵  $\nabla_{\theta}X(t)$ ,即结构响应对损伤参数的灵敏度  $\frac{\partial X(\theta, t)}{\partial \theta}$ 。根据模态分析方法<sup>[17]</sup>,结构响应为

$$\begin{aligned} X(\theta, t) &= \Phi(\theta)q(\theta, t) \\ X(\theta, t_0) &= X_0, \dot{X}(\theta, t_0) = \dot{X}_0 \end{aligned} \quad (14)$$

式中: $X_0, \dot{X}_0$  为结构初始状态; $\Phi(\theta)$  为结构模态矩阵; $q(\theta, t)$  为模态坐标,在比例阻尼的条件下, $q(\theta, t)$  满足如下解耦的模态坐标微分方程:

$$\ddot{q}(\theta, t) + C^*(\theta)\dot{q}(\theta, t) + \Lambda(\theta)q(\theta, t) = \Phi(\theta)^T F(t) \quad (15)$$

式中: $C^*(\theta) = \text{diag}(2\xi_1\omega_1, 2\xi_2\omega_2, \dots, 2\xi_{N_d}\omega_{N_d})$  为模态阻尼矩阵; $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{N_d}$  为阻尼比; $\Lambda(\theta) = \text{diag}(\omega_{21}^2, \omega_{22}^2, \dots, \omega_{N_d}^2), \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_{N_d}$  为模态固有频率。

式(14)两边对  $\theta$  求偏导,得到

$$\frac{\partial X(\theta, t)}{\partial \theta} = \Phi(\theta) \frac{\partial q(\theta, t)}{\partial \theta} + \frac{\partial \Phi(\theta)}{\partial \theta} q(\theta, t) \quad (16)$$

定义  $r(\theta, t) = \frac{\partial q(\theta, t)}{\partial \theta}$ , 在式(15)的两边对  $\theta$  求微分,整理可得

$$\begin{aligned} \ddot{r}(\theta, t) + C^*(\theta)\dot{r}(\theta, t) + \Lambda(\theta)r(\theta, t) = \\ - \frac{\partial C^*(\theta)}{\partial \theta} \dot{q}(\theta, t) - \frac{\partial \Lambda(\theta)}{\partial \theta} q(\theta, t) + \frac{\partial \Phi^T(\theta)}{\partial \theta} F(t) \end{aligned} \quad (17)$$

假定初始条件  $r(\theta, t_0) = 0, \dot{r}(\theta, t_0) = 0$ , 可求解  $r(\theta, t)$ 。 $\frac{\partial \Lambda(\theta)}{\partial \theta}$  和  $\frac{\partial \Phi(\theta)}{\partial \theta}$  分别为系统特征值和特征向量对参数的灵敏度,求解过程可参考文献[18]。

## 3 距离系数-Fisher 信息准则

考虑结构全部自由度对应的 Fisher 信息矩阵:

$$J(\delta\theta) = \sum_{i=1}^N (\nabla_{\theta}X(t))^T (\Sigma(t))^{-1} (\nabla_{\theta}X(t)) \quad (18)$$

令  $a_i(t)$  为雅可比矩阵  $\nabla_{\theta}X(t)$  的第  $i$  行,由于  $\Sigma(t)$  为对角阵,可将 Fisher 信息矩阵表达为各个自由度贡献之和的形式,即

$$\begin{aligned} J(\delta\theta) &= \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma^2} \sum_{t=1}^{N_d} a_i^T(t) a_i(t) = \\ &\frac{1}{\sigma^2} \sum_{i=1}^{N_d} \sum_{t=1}^N a_i^T(t) a_i(t) \end{aligned} \quad (19)$$

式中  $\sigma^2$  是一个常数,不会影响传感器优化布置结果,所以规定第  $k$  个自由度对应的 Fisher 信息矩阵为  $A^k = \sum_{t=1}^N a_k^T(t) a_k(t)$ , 则

$$J(\delta\theta) = \frac{1}{\sigma^2} \sum_{k=1}^{N_d} A^k \quad (20)$$

如果有两个自由度所对应的 Fisher 信息矩阵是非常相似的,那么测量这两个自由度上的结构响应与仅测量其中一个自由度得到的信息量是基本相同的,即使这两个自由度对于结构损伤参数的估计都有很大的贡献。

采用欧氏距离来度量两个测点之间的信息阵的相似性<sup>[19]</sup>。根据定义,  $n$  维向量  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  和  $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$  之间的欧氏距离为  $d(x, y) = \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_j - y_j)^2}$ , 将该定义从一维向量扩展到二维矩阵,则测点  $k$  和测点  $l$  所对应的信息矩阵之间的欧氏距离为

$$d_{kl} = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{\theta}} \sum_{j=1}^{N_{\theta}} |A_{ij}^k - A_{ij}^l|^2} \quad (21)$$

式中信息矩阵的维数  $N_{\theta}$  即为损伤参数  $\theta$  中元素的数目。为了方便引入权重系数,对欧氏距离做标准化处理

$$\begin{aligned} D_{kl} &= \frac{d_{kl}}{d_{\max}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{N_{\theta}} \sum_{j=1}^{N_{\theta}} |A_{ij}^k - A_{ij}^l|^2}}{d_{\max}} \\ 0 &\leq D_{kl} \leq 1, \forall k, l \end{aligned} \quad (22)$$

式中:  $d_{\max}$  为一组候选测点中最大的欧氏距离。

若用  $s$  表示已经选择的传感器测点集合,定义待选测点  $k$  对应的 Fisher 信息矩阵的距离系数为

$$R_k = \min(D_{ks}), \forall s \quad (23)$$

利用  $R_k$  加权式(20)中的 Fisher 信息阵,得到新的有效信息阵,即

$$J'(\delta\theta) = \sum_{k=1}^{N_d} R_k A^k \quad (24)$$

以距离系数修正的有效 Fisher 信息矩阵范数最大化为目标的传感器布置准则,称为传感器优化布置的距离系数-Fisher 信息准则。

## 4 距离系数-Fisher 信息准则下的传感器优化布置算法

本文以常用的行列式作为待优化的范数形式,采用逐步累加的方法<sup>[20]</sup>来实现距离系数-Fisher 信息准则下的传感器优化布置,以得到同时满足损伤参数可识别和避免信息冗余的测点布置方案,从测量的  $N_d$  个自由度中选择  $N_0$  个位置布设传感器,具



步骤如下。

1) 分别计算每个候选自由度对应的 Fisher 信息矩阵的行列式,记录行列式值最大的候选自由度,作为第一个测点位置。

2) 假设已经确定了  $m$  个测点位置,且  $m < N_0$ ,此时还剩余  $N_d - m$  个候选自由度。

①根据式 (21) 分别计算第  $m$  个测点与剩余  $N_d - m$  个候选自由度的信息阵之间的欧氏距离  $d_{km}$ ,下标  $k$  表示第  $k$  个候选自由度,记录  $N_d - m$  个距离中的最大值  $d_{\max}$ ,并由式 (22) 得到标准化的欧氏距离  $D_{km}$ 。

②当  $m = 1$  时,只有一个已选测点,所以  $R_k = D_{k1}$ ;当  $m > 1$  时,为保证式 (23) 成立,比较  $R_k$  和  $D_{km}$ ,若  $D_{km} < R_k$ ,则更新  $R_k = D_{km}$ ,否则  $R_k$  不变。

③将第  $k$  个候选自由度增加到已选测点集合中,计算该  $m+1$  个测点所对应的有效信息阵的行列式,计算公式为

$$T_k^{m+1} = \det \left( \sum_{i=1}^m R_i A^i + R_k A^k \right) \quad (25)$$

遍历  $N_d - m$  个候选自由度,记录使  $T_k^{m+1}$  最大的候选自由度作为第  $m+1$  个测点。

3) 重复 2), 确定剩余传感器布置位置,直至确定全部  $N_0$  个测点位置,得到基于距离系数-Fisher 信息准则的传感器优化布置方案。

## 5 数值算例

以图 1 所示的 16 自由度剪切型弹簧-质量模型为研究对象,将每个弹簧刚度的变化作为待识别参数。以位移传感器为例,分别运用传统 Fisher 信息准则和距离系数-Fisher 信息准则进行传感器优化布置。

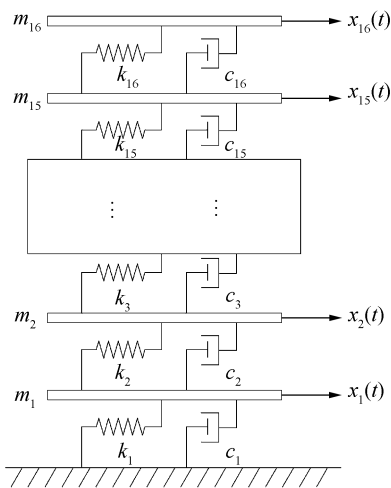


图 1 16 自由度剪切型弹簧-质量模型

Fig.1 16 DOFs shear type spring-mass model

### 5.1 模型简介

模型结构参数:  $m_1 \sim m_4 = 5 \text{ kg}$ ,  $m_5 \sim m_8 = 4 \text{ kg}$ ,  $m_9 \sim m_{12} = 3 \text{ kg}$ ,  $m_{13} \sim m_{16} = 2 \text{ kg}$ ;  $k_5 \sim k_8 = 700 \text{ N/m}$ ,

$k_9 \sim k_{12} = 600 \text{ N/m}$ ,  $k_{13} \sim k_{16} = 500 \text{ N/m}$ ; 采用比例阻尼,各阶模态阻尼比均为 0.02。图 2 所示为模型前 4 阶振型。

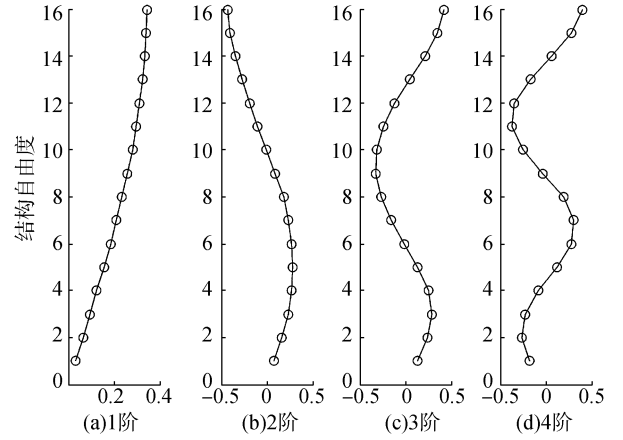


图 2 模型前四阶振型

Fig.2 First 4 mode shapes of the spring-mass model

在试验之前,结构所受激励是未知的。由于可以利用自由振动响应重构结构的参数信息,因此通过在初始条件  $x_{16} = 0, \dot{x}_{16} = 1$  下的自由振动响应来计算 Fisher 信息矩阵。随着自由振动的衰减, Fisher 信息逐渐趋于稳定值,计算时间的选取应以 Fisher 信息的收敛为准则,根据图 3 中所示刚度变化量  $\delta K_1$  的 Fisher 信息随时间的变化,选取计算时间 180 s,采样间隔 0.02 s,数值计算采用逐步积分法 Newmark- $\beta$  法。仿真运算软件使用 MATLAB R2009b,在华硕 A56C (CPU: Intel Core i5-3317U, 1.7 GHz, 内存 4 GB) 上运行。

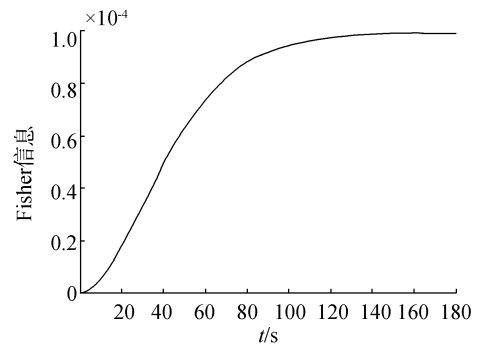


图 3  $\delta K_1$  的 Fisher 信息

Fig.3 Fisher information of  $\delta K_1$

### 5.2 灵敏度分析

求得结构响应对于损伤参数的灵敏度矩阵  $\nabla_{\theta} \mathbf{X}(t)$  是计算 Fisher 信息矩阵的关键,可通过 2.2 节介绍的方法实现。在实际工程中,结构自由度数目巨大,为了提高计算效率,可选取振型灵敏度系数大的部分模态进行求解。

图 4(a) 为自由度 4、12、16 上的位移响应对于损伤参数  $\delta K_1$  的灵敏度,可以看出,越靠近悬臂顶端的自由度,其位移响应对于  $\delta K_1$  越敏感,这一结论对其余损伤参数依然成立。图 4(b) 显示了第 16 自由度上的位移响应对于  $\delta K_1, \delta K_6, \delta K_{11}$  的灵敏度,可见,损伤

参数越靠近悬臂根部,第16自由度上的位移响应对其越敏感,悬臂的其他自由度位移变化也满足这一规律。

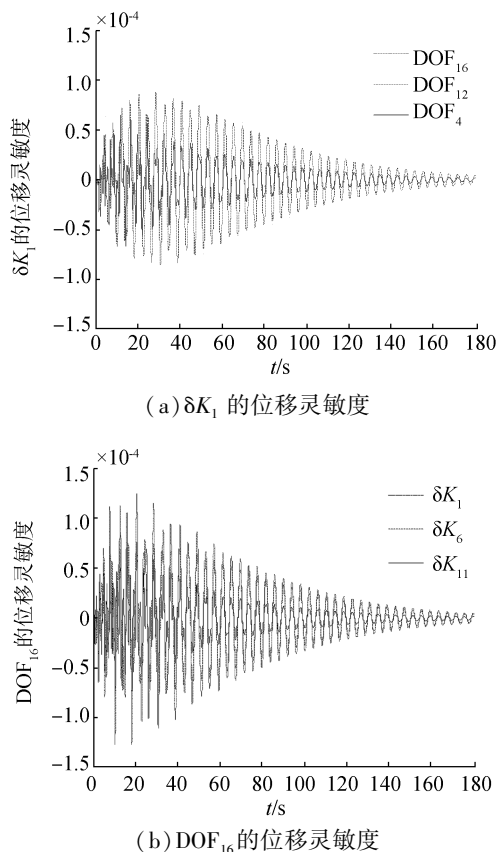


图4 结构位移响应对损伤参数的灵敏度

Fig. 4 Sensitivity of structural displacements with respect to damage parameters

### 5.3 传感器优化布置方案

为方便分析,假定噪声协方差矩阵  $\Sigma = \mathbf{I}_{N_d}$ 。采用逐步累加的方法<sup>[20]</sup>,使 Fisher 信息矩阵的行列式最大化,得到基于传统 Fisher 信息准则的传感器优化布置方案如图5所示。

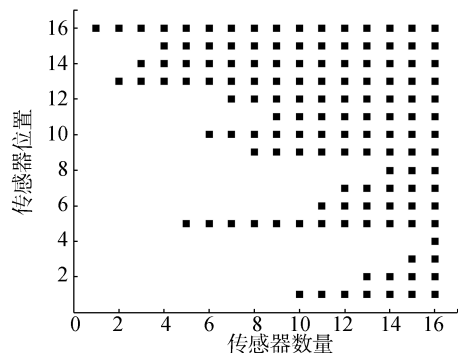


图5 基于传统 Fisher 信息准则的传感器优化布置方案

Fig.5 Scheme of optimal sensor placement based on traditional Fisher information criterion

Fisher 信息矩阵包含结构响应对损伤参数的灵敏度信息,最大化 Fisher 信息阵的行列式得到的传感器测点满足对损伤参数的敏感性要求。在图5中,测点分布于结构响应对损伤参数的敏感区,从

而能够最大程度上发现损伤的发生,但测点在悬臂顶端聚集,并不满足损伤参数可观性的要求,即不利于损伤定位。根据工程经验,在实际布设传感器时,力求将传感器分散布置,避免局部过分集中现象<sup>[17]</sup>。

运用基于距离系数-Fisher 信息准则的传感器布置方法,得到的传感器布置方案如图6所示。

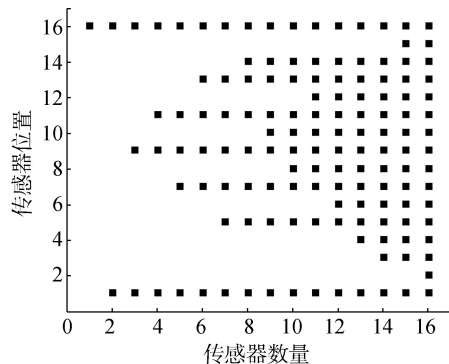


图6 基于距离系数-Fisher 信息准则的传感器优化布置方案

Fig.6 Scheme of optimal sensor placement based on distance coefficient-Fisher information criterion

由图6可以看出,其测点分布更加分散,大部分测点位于悬臂上半部分对损伤参数较敏感的区域。当传感器数目较少时,测点之间能够保持一定的距离,避免了信息冗余问题,同时符合实际工程经验。

综上所述,基于距离系数-Fisher 信息准则得到的传感器测点满足结构响应对损伤参数敏感性的要求,同时保证不同测点间的信息相互独立。

## 6 结论

基于传统 Fisher 信息准则,采用距离系数修正 Fisher 信息矩阵,得到距离系数-Fisher 信息准则。以一个16自由度剪切型弹簧-质量模型作为算例,比较分析传统 Fisher 信息准则和距离系数-Fisher 信息准则下的传感器优化布置结果,得出以下结论:

1) Fisher 信息准则通过使 Fisher 信息矩阵的范数最大化,使得估计误差的协方差矩阵最小,即最小化结构损伤参数的估计误差。

2) 基于传统 Fisher 信息准则的传感器布置方案中,测点聚集在结构响应对损伤参数的敏感区,产生信息冗余。

3) 基于距离系数-Fisher 信息准则得出的传感器布置方案空间分布更加合理,测点大部分位于结构响应对损伤参数的敏感区,同时相互之间保持一定的距离,避免了信息冗余问题,在能够判定损伤发生的同时,有利于损伤定位。

4) 需要进一步深入研究,比较本文方法与其他传感器优化布置方法对实际结构的损伤识别效果。

## 参考文献:

[1] SHADAN F, KHOSHNOUDIAN F, ESFANDIARI A. A

- frequency response-based structural damage identification using model updating method [J]. Structural control & health monitoring, 2016, 23(2): 286-302.
- [2] 胡焕. 基于频响函数的动力学模型修正方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
- HU Huan. Investigation of dynamics model updating method based on FRF[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2010.
- [3] 卢洋. 基于频响函数模式置信准则的桥梁损伤动力识别方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- LU Yang. Study on dynamic identification method for bridge damage based on signature assurance criterion of frequency response functions[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [4] HE Can, XING Jianchun, LI Juelong, et al. A new optimal sensor placement strategy based on modified modal assurance criterion and improved adaptive genetic algorithm for structural health monitoring[J]. Mathematical problems in engineering, 2015, 2015: 1-10.
- [5] DEBNATH N, DUTTA A, DEB S K. Placement of sensors in operational modal analysis for truss bridges [J]. Mechanical systems and signal processing, 2012, 31: 196-216.
- [6] YI T H, WANG X, LI H N. Optimal placement of triaxial accelerometers using modal kinetic energy method [J]. Applied mechanics and materials, 2012, 166-169: 1583-1586.
- [7] 伊廷华, 李宏男, 顾明. 基于模型缩聚的广州新电视塔传感器优化布置研究[J]. 工程力学, 2012, 29(3): 55-61.
- YI Tinghua, LI Hongnan, GU Ming. Research on optimal sensor placement of Guangzhou new TV tower based on model reduction [J]. Engineering mechanics, 2012, 29(3): 55-61.
- [8] UDWADIA F E. Methodology for optimum sensor locations for parameter identification in dynamic systems[J]. Journal of engineering mechanics, 1994, 120(2): 368-390.
- [9] 李东升, 张莹, 任亮, 等. 结构健康监测中的传感器布置方法及评价准则[J]. 力学进展, 2011, 41(1): 39-50.
- LI Dongsheng, ZHANG Ying, REN Liang, et al. Sensor deployment for structural health monitoring and their evaluation [J]. Advances in mechanics, 2011, 41(1): 39-50.
- [10] KAMMER D C. Sensor placement for on-orbit modal identification and correlation of large space structures[J]. Journal of guidance, control, and dynamics, 1991, 14(2): 251-259.
- [11] KAMMER D C, TINKER M L. Optimal placement of triaxial accelerometers for modal vibration tests [J]. Mechanical systems and signal processing, 2004, 18(1): 29-41.
- [12] YI Tinghua, LI Hongnan, WANG Chuanwei. Multiaxial sensor placement optimization in structural health monitoring using distributed wolf algorithm[J]. Structural control & health monitoring, 2016, 23(4): 719-734.
- [13] CASTRO-TRIGUERO R, SAAVEDRA FLORES E I, DIAZDELAO F A, et al. Optimal sensor placement in timber structures by means of a multi-scale approach with material uncertainty [J]. Structural control & health monitoring, 2014, 21(12): 1437-1452.
- [14] NIMITYONGSKUL S, KAMMER D C. Frequency response based sensor placement for the mid-frequency range [J]. Mechanical systems and signal processing, 2009, 23(4): 1169-1179.
- [15] FRISWELL M I, CASTRO-TRIGUERO R. Clustering of sensor locations using the effective independence method [J]. AIAA journal, 2015, 53(5): 1388-1391.
- [16] LI Shiqi, ZHANG Heng, LIU Shiping, et al. Optimal sensor placement using FRFs-based clustering method[J]. Journal of sound and vibration, 2016, 385: 69-80.
- [17] 李宾宾. 基于信息论的结构健康监测传感器优化布置[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- LI Binbin. Information theoretic optimal sensor placement in structural health monitoring [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.
- [18] 周述美, 鲍跃全, 李惠. 基于子结构灵敏度分析的传感器优化布置[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(4): 242-247.
- ZHOU Shumei, BAO Yuequan, LI Hui. Optimal sensor placement based on substructure sensitivity analysis [J]. Earthquake engineering and engineering dynamic, 2014, 34(4): 242-247.
- [19] 白雪. 聚类分析中的相似性度量及其应用研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- BAI Xue. Similarity measures in cluster analysis and its applications[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [20] 何龙军, 练继建, 马斌, 等. 基于距离系数-有效独立法的大型空间结构传感器优化布置[J]. 振动与冲击, 2013, 32(16): 13-18.
- HE Longjun, LIAN Jijian, MA Bin, et al. Optimal sensor placement for large space structures based on distance coefficient-effective independence method [J]. Journal of vibration and shock, 2013, 32(16): 13-18.

#### 作者简介:



董小圆,男,1988年生,硕士研究生,主要研究方向为传感器优化布置。



彭珍瑞,男,1972年生,教授,博士生导师,主要研究方向为智能优化、测控技术。现主持国家自然科学基金项目1项、甘肃省科技支撑计划项目1项、兰州市科技计划项目1项。发表学术论文30余篇,获得实用新型专利10余件。



殷红,女,1978年生,副教授,主要研究方向为智能优化和模态分析。主持甘肃省自然科学基金项目1项。近年来获得甘肃省教育厅教学成果奖、甘肃省高校科技进步奖等奖项。发表学术论文近20篇,编写教材5部。